

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Martina Benc**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Martina Benc

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću na ukazanom strpljenju, dr. sc. Danijelu Šestanu na pomoći prilikom izrade rada te ostalim djelatnicima Laboratorija za procesna mjerenja.

Martina Benc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martina Benc**

Mat. br.: 0035193251

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **Ispitivanje termometrijske komore**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **Testing of thermometric chamber**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja termometrijske komore u području od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $70^{\circ}\text{C}$ . Postupak treba obuhvatiti određivanje prostornih temperaturnih gradijenata, stalnosti temperature i dinamike zagrijavanja. U navedenoj komori će se provoditi usporedbeno umjeravanje termometara te je temperaturne gradijente i stalnost temperature potrebno definirati kao sastavnice koje doprinose procjeni ukupne mjerne nesigurnosti umjeravanja. Za ispitivanje će se koristiti postojeće mjerne linije u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM). Potrebno je:

- Izraditi pregled teorijskih osnova za ispitivanja termometrijskih komora.
- Opisati postupak za procjenu mjerne nesigurnosti, kako samog ispitivanja tako i utjecaja rezultata na ukupnu mjernu nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara.
- Definirati ispitni postupak za ispitivanje i karakterizaciju termometrijske komore, što uključuje utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata temperature, stalnosti i dinamike zagrijavanja.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM. Dati opis sheme spajanja ispitnog sustava sa pomoćnim uređajima.
- Izraditi opis postupka ispitivanja.
- Priložiti primjere u obliku rezultata ispitivanja sa procijenjenim doprinosima zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti usporedbenog umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

**1. rok:** 23. veljače 2018.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.

**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 26.2. - 02.03. 2018.

**2. rok (izvanredni):** 2. 07. 2018.

**3. rok:** 24.9. - 28. 09. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....                                    | III  |
| POPIS TABLICA .....                                  | IV   |
| POPIS DIJAGRAMA .....                                | V    |
| POPIS OZNAKA .....                                   | VI   |
| SAŽETAK .....  | VII  |
| SUMMARY .....  | VIII |
| 1. UVOD .....  | 1    |
| 2. TEORIJSKE OSNOVE .....                            | 2    |
| 2.1. Temperatura .....                               | 2    |
| 2.2. Mjerenje temperature .....                      | 2    |
| 2.2.1. Mjerenje temperature otpornim uređajima ..... | 3    |
| 2.3. Umjeravanje .....                               | 3    |
| 2.3.1. Usporedbeno umjeravanje termometara .....     | 4    |
| 2.4. Osnove ispitivanja termometrijske komore .....  | 4    |
| 2.4.1. Zahtjevi na komore .....                      | 4    |
| 2.4.2. Metode ispitivanja komore .....               | 5    |
| 2.4.2.1. Metoda A .....                              | 5    |
| 2.4.2.2. Metoda B .....                              | 5    |
| 2.4.2.3. Metoda C .....                              | 6    |
| 3. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI .....                | 7    |
| 3.1. Mjerna nesigurnost .....                        | 7    |
| 3.2. Pogreške kod mjerenja .....                     | 7    |
| 3.2.1. Sustavne pogreške .....                       | 8    |
| 3.2.2. Slučajne pogreške .....                       | 8    |
| 3.3. Izračun mjerne nesigurnosti .....               | 8    |
| 3.3.1. Izračun pojedinačne mjerne nesigurnosti ..... | 8    |
| 3.3.1.1. Procjene tipa A .....                       | 8    |
| 3.3.1.2. Procjene tipa B .....                       | 10   |
| 3.3.2. Izračun kombinirane mjerne nesigurnosti ..... | 10   |
| 3.4. Doprinosi mjernoj nesigurnosti .....            | 11   |
| 3.4.1. Prostorni temperaturni gradijent .....        | 11   |
| 3.4.2. Vremenska nestabilnost .....                  | 12   |
| 3.4.3. Utjecaj zračenja .....                        | 12   |
| 3.5. Ukupna standardna nesigurnost .....             | 13   |
| 4. ISPITNI POSTUPCI .....                            | 15   |
| 4.1. Raspored mjernih lokacija .....                 | 15   |
| 4.1.1. Metoda A i B .....                            | 15   |
| 4.1.2. Metoda C .....                                | 15   |
| 4.2. Određivanje prostornih gradijenata .....        | 15   |
| 4.3. Određivanje vremenske nestabilnosti .....       | 16   |



|  |    |
|--|----|
| 4.4. Određivanje dinamike zagrijavanja .....                             | 16 |
| 5. UMJERAVANJE TERMOMETARA .....   | 17 |
| 5.1. Opis postupka umjeravanja termometara .....                         | 17 |
| 5.2. Mjerna oprema i uređaji korišteni pri umjeravanju termometara ..... | 17 |
| 5.2.1. Etalonski termometar .....  | 17 |
| 5.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most .....                    | 19 |
| 5.2.3. Termometrijske kupke .....  | 19 |
| 5.2.4. Umjeravani termometri .....                                       | 20 |
| 5.2.5. Računalo .....  | 20 |
| 6. ISPITIVANJE KOMORE U LPM .....  | 26 |
| 6.1. Shema ispitnog sustava .....  | 26 |
| 6.2. Mjerni uređaji i oprema korišteni pri ispitivanju komore .....      | 26 |
| 6.2.1. Ispitivana komora .....   | 26 |
| 6.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most .....                    | 27 |
| 6.2.3. Etalonski otpornik u grijanom kućištu .....                       | 28 |
| 6.2.4. Računalo .....  | 28 |
| 6.3. Opis postupka ispitivanja .....                                     | 29 |
| 7. REZULTATI ISPITIVANJA KOMORE .....                                    | 31 |
| 7.1. Rezultati ispitivanja dinamike zagrijavanja .....                   | 31 |
| 7.2. Izračun doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti .....                | 33 |
| 8. ZAKLJUČAK .....   | 38 |
| LITERATURA .....   | 39 |
| PRILOZI .....  | 40 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Gaussova raspodjela .....                      | 9  |
| Slika 2.  | Pravokutna raspodjela .....                    | 10 |
| Slika 3.  | Etalonski termometar .....                     | 18 |
| Slika 4.  | Etalonski termometrijski otpornički most ..... | 19 |
| Slika 5.  | Kupka (TEKUP11).....                           | 20 |
| Slika 6.  | Kupka (TEKUP01).....                           | 20 |
| Slika 7.  | Shema ispitnog sustava.....                    | 26 |
| Slika 8.  | Termometrijska komora .....                    | 27 |
| Slika 9.  | Etalonski termometrijski otpornički most ..... | 28 |
| Slika 10. | Etalonski otpornik u grijanom kućištu .....    | 28 |
| Slika 11. | Smještaj termometara u komori .....            | 30 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Karakteristike etalonskog termometra.....            | 18 |
| Tablica 2. Karakteristike etalonskog termometrijskog most ..... | 19 |
| Tablica 3. Karakteristike termometrijskih kupki.....            | 19 |
| Tablica 4. Karakteristike otporničkih termometara.....          | 20 |
| Tablica 5. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, a ..... | 21 |
| Tablica 6. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, b.....  | 21 |
| Tablica 7. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, a .....   | 22 |
| Tablica 8. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, b .....   | 22 |
| Tablica 9. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, a .....  | 23 |
| Tablica 10. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, b ..... | 23 |
| Tablica 11. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, a ..... | 24 |
| Tablica 12. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, b ..... | 24 |
| Tablica 13. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, a ..... | 25 |
| Tablica 14. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, b ..... | 25 |
| Tablica 15. Karakteristike komore .....                         | 26 |
| Tablica 16. Rezultati ispitivanja komore pri -20 °C .....       | 33 |
| Tablica 17. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri -20 °C.....  | 33 |
| Tablica 18. Rezultati ispitivanja komore pri 0 °C.....          | 34 |
| Tablica 19. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 0 °C.....    | 34 |
| Tablica 20. Rezultati ispitivanja komore pri 25 °C.....         | 35 |
| Tablica 21. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 25 °C.....   | 35 |
| Tablica 22. Rezultati ispitivanja komore pri 50 °C.....         | 36 |
| Tablica 23. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 50 °C.....   | 36 |
| Tablica 24. Rezultati ispitivanja komore pri 70 °C.....         | 37 |
| Tablica 25. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 70 °C.....   | 37 |
| Tablica 26. Izmjerene vrijednosti temperature pri -20 °C .....  | 40 |
| Tablica 27. Izmjerene vrijednosti temperature pri 0 °C.....     | 41 |
| Tablica 28. Izmjerene vrijednosti temperature pri 25 °C.....    | 42 |
| Tablica 29. Izmjerene vrijednosti temperature pri 50 °C.....    | 43 |
| Tablica 30. Izmjerene vrijednosti temperature pri 70 °C.....    | 44 |



**POPIS DIJAGRAMA**

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Dijagram 1. | Ispitivanje dinamike zagrijavanja od -20 °C do 0 °C.....  | 31 |
| Dijagram 2. | Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do -20 °C..... | 31 |
| Dijagram 3. | Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do 50 °C ..... | 32 |
| Dijagram 4. | Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 50 °C do 70 °C ..... | 32 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka             | Jedinica | Opis   |
|--------------------|----------|--|
| $\bar{X}$          | -        | srednja vrijednost   |
| $s$                | -        | standardna devijacija  |
| $u_A$              | mK       | standardna nesigurnost tipa A                                  |
| $u_B$              | mK       | standardna nesigurnost tipa B                                  |
| $a$                | -        | poluinterval sigurnosti  |
| $U$                | mK       | proširena mjerna nesigurnost                                   |
| $k$                | -        | faktor pokrivanja  |
| $t_{sr}(i)$        | °C       | srednja temperatura i-tog termometra                           |
| $t$                | °C       | temperatura  |
| $\Delta t_{ref}$   | °C       | gradijent između referentne točke te jedne od mjernih lokacija |
| $\delta t_{nehom}$ | °C       | prostorna nehomogenost   |
| $\delta t_{zr}$    | °C       | utjecaj zračenja   |
| $grad\ \vartheta$  | °C       | temperaturni gradijent   |
| $\Delta t_{reg}$   | °C       | odstupanje regulatora temperature komore                       |
| $t_{ref}$          | °C       | srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj točki   |
| $\delta t_{ref}$   | °C       | Odstupanje referentnog termometra                              |
| $\delta t_{drift}$ | °C       | klizanje termometara   |
| $t_{kom}$          | °C       | vrijednost temperature postavljene na regulatoru komore        |
| $\delta t_{rez}$   | °C       | rezolucija namještanja temperature u komori                    |
| $\delta t_{stab}$  | °C       | stabilnost temperature u komori                                |

## SAŽETAK

Glavni zadatak ovoga rada bio je ispitati termometrijsku komoru za temperaturno područje od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ispitivanje se odvijalo na pet različitih temperatura, a to su:  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  te  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Postupak ispitivanja obuhvatio je određivanje prostornih temperaturnih gradijenata (prostorne nehomogenosti), vremenske nestabilnosti te dinamike zagrijavanja. Također je određen pojedini doprinos zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja termometara. Osim ispitivanja komore odrađeno je i umjeravanje otporničkih termometara u kupkama.

Ključne riječi: prostorna nehomogenost, vremenska nestabilnost, umjeravanje, mjerna nesigurnost

## **SUMMARY**

The main task of this thesis was to test the thermometric chamber for the temperature range from -20 °C do 70 °C. Testing took place at five different temperatures, which are: -20 °C, 0°C, 25 °C, 50 °C and 70 °C. The calibration procedures included determination of the spatial temperature gradients (spatial inhomogeneity), temporal instability and the heating rate. Individual contributions to the overall measurement uncertainty of thermometers calibration were also determined. Beside the testing of the chamber, calibration of the resistance thermometers was done.

Key words: spatial inhomogeneity, temporal instability, calibration, measurement uncertainty

## 1. UVOD

Tema ovoga rada je ispitivanje karakteristika termometrijske komore koje utječu na ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja termometara.

Termometrijska komora je objekt u kojem možemo ostvariti odabranu vrijednost temperature u zatvorenom volumenu u određenom radnom području. U komori je definiran koristan volumen određen mjernim lokacijama. Može biti stacionarna ili pomična.

Mjerna lokacija je mjesto unutar korisnog volumena u kojem su postavljeni temperaturni senzori. Zapravo predstavlja volumen definiran dimenzijama senzora.

Koristan volumen je dio volumena komore koji je određen mjernim lokacijama u kojima se nalaze senzori za ispitivanje. Ovisno o rasporedu mjernih lokacija, koristan volumen se može znatno razlikovati od ukupnog volumena komore. Rezultati dobiveni ispitivanjem važeći su samo za koristan volumen.

Osim ispitivanja komore, radilo se i umjeravanje termometara koji su korišteni tokom njezinog ispitivanja. Umjeravanje termometara odvijalo se u dvjema kupkama, zbog različitog raspona ispitnih temperatura. Ispitivanje termometrijske komore se odrađivalo za pet ispitnih temperatura koje se nalaze u temperaturnom području od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Umjeravanje termometara se također odvijalo na istim temperaturama.

Dobiveni rezultati ispitivanja nam daju uvid u ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja termometara te se mogu koristiti prilikom budućih umjeravanja.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

### 2.1. Temperatura

Za temperaturu možemo reći da predstavlja mjeru zagrijanosti (ohlađenosti) nekog tijela ili sustava, ali to nam ne daje pravu definiciju temperature jer je subjektivno tvrditi da je nešto toplo, odnosno hladno. Temperatura je toplinsko stanje tijela ili sustava te ovisi o tome koliko topline sadrži tijelo određene mase. Kada određujemo toplinu nekog tijela ili procesa, glavna veličina koja se mjeri je upravo temperatura.

Temperatura je veličina sustava koja se ne može mjeriti direktno, nego usporedbom s nekom drugom mjerljivom veličinom. Najčešće ju uspoređujemo s visinom stupca žive kod živinog termometra. Pri dovođenju živinog termometra u dodir s promatranim tijelom, u određenim uvjetima, tijekom nekog vremena uočavamo promjenu stupca žive. Kada više ne uočavamo značajnu promjenu mjerene veličine, možemo reći da je postignuta toplinska ravnoteža, odnosno da su temperature u sustavu jednake. O tome nam govori nulti zakon termodinamike, prema kojem svaki sustav prepušten sam sebi prirodno teži postizanju ravnoteže, te kada je ona postignuta, sve mjerljive veličine u sustavu nestaju.

### 2.2. Mjerenje temperature

Pošto temperatura nije aditivna veličina, nego se mjeri usporedbom s nekom drugom mjerljivom veličinom, za temperaturu jer potrebno ustanoviti fiksne referentne točke, kao što su ledište ili vrelište neke tvari, pri kojima je jasno definiran prijelaz između krutog, kapljevito i plinovito stanje. Fiksne referentne točke definirane su prema Međunarodnoj temperaturnoj skali (ITS-International Practical Temperature Scale). Neke od tih točaka su:

- Trojna točka ravnotežnog vodika ( $-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Vrelište kisika ( $-182,962\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Vrelište vode ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Ledište srebra ( $961,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Ledište cinka ( $419,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Ledište zlata ( $1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Sve temperature su definirane za standardni atmosferski tlak.

Instrumenti za mjerenje temperature mogu se podijeliti u grupe, u ovisnosti o principu njihovog djelovanja. Neki od glavnih principa su:

- Termoelektrični efekt
- Promjena otpora
- Toplinsko širenje
- Promjena boje
- Promjena stanja materijala

### **2.2.1. Mjerenje temperature otpornim uređajima**

Kod ovakvih uređaja, prilikom promjene temperature, dolazi do promjene otpora. Mogu se podijeliti na otporne termometre i termistore, ovisno o tome jesu li na načinjeni od metala ili poluvodiča.

Termistori su načinjeni od krutih poluvodiča koji imaju veliki negativni temperaturni koeficijent otpora (s porastom temperature otpor pada). Materijali koji se koriste za njihovu proizvodnju su: nikal, bakar, kobalt, željezo, cink, aluminij, magnezij.

Kod otpornog termometra mjerni osjetnik je najčešće zavojnica malog promjera, izrađena od platine, nikla, bakra ili nekog drugog metala. Najčešće se koristi platina, a nakon nje i nikal zbog toga što posjeduju veliku i stabilnu vrijednost temperaturnog koeficijenta otpora, te se lako dobivaju kao visoko čisti materijali. U usporedbi s platinom, bakar i nikal su osjetljiviji na oksidaciju i koroziju, što znatno ograničava njihovu točnost i trajnost. Za mjerenje temperature otpornim termometrima mogu se koristiti uobičajene metode, metoda otklona ili metoda kompenzacije.

### **2.3. Umjeravanje**

Umjeravanje je znanost točnog prenošenja neke fizikalne veličine od etalona do nepoznatog mjerila. Etaloni su certificirani uređaji visoke točnosti, koje koristimo za umjeravanje. Umjeravanje se sastoji od usporedbe izlaza koje pokazuje ispitivani instrument i izlaza etalona, nakon što su oba uređaja podvrgnuta jednakom ulazu (mjernoj količini). Postupak se provodi za cijeli mjerni raspon uređaja za mjerenje.

Umjeravanjem nam je osigurana točnost pokazivanja instrumenata pod uvjetom da se koriste u jednakim okolišnim uvjetima u kojima se umjeravanje odvijalo. Ako se instrumenti



koristeu drugačijim okolišnim uvjetima, potrebno je izvršiti korekciju mjernih rezultata te dati procjenu mjerne nesigurnosti.

Umjeravanje uređaja se treba ponoviti nakon određenog vremenskog intervala zbog promjene karakteristika uređaja. Do promjena karakteristika može doći zbog mehaničkog trošenja, utjecaja prašine, kemikalija itd.

### **2.3.1. Usporedbeno umjeravanje termometara**

Usporedbeno umjeravanje termometara je usporedba umjeravanog termometra s etalonskim u zoni kontrolirane temperature. Nakon njihovog postavljanja u zonu kontrolirane temperature i uspostavljanja toplinske ravnoteže, tj. kada su se očitavanja ustalila, vrši se određen broj očitavanja. Vrijednosti koje očitavamo su vrijednosti otpora, pomoću kojih interpolacijom računamo temperaturu u zoni. Postupak se ponavlja za sve temperaturne točke u zoni, nakon čega možemo izračunati koeficijente za polinom koji koristimo pri interpolaciji.

## **2.4. Osnove ispitivanja termometrijske komore**

### **2.4.1. Zahtjevi na komore**

Kako bi klimatska komora mogla biti ispitana, treba zadovoljiti slijedeće zahtjeve:

- Trebaju biti dostupni senzori za mjerenje temperature s pripadajućim pokazateljima kao sastavni dijelovi komore.
- Moraju postojati kontrolni sustavi za vrijednosti koje se ispituju kao dijelovi komore.
- Mora biti dostupna tehnička dokumentacija od strane proizvođača.
- Trebaju postojati tehnički podaci o kategoriji senzora, kao što su na primjer pozicija i karakteristike senzora.
- U komori treba vladati atmosferski tlak (treba biti osigurana mogućnost izjednačavanja tlaka u komori s okolišnim).
- Za određeno temperaturno područje rada komore, ispitivanje je potrebno provesti za najmanje tri temperature. Ispitivanje na samo jednoj temperaturi je moguće, ali se rezultat odnosi samo na tu radnu točku te to mora biti navedeno u potvrdi o ispitivanju.
- Ako dolazi do pojave toplinskih gubitaka unutar korisnog volumena, taj utjecaj se mora odrediti u okviru doprinosa mjernoj nesigurnosti zbog utjecaja punjenja.

### **2.4.2. Metode ispitivanja komore**

Ispitivanje komore može se provoditi na tri različite metode.

#### **2.4.2.1. Metoda A**

Ispitivanje prema ovoj metodi se odnosi na koristan volumen određen mjernim lokacijama u nenapunjenoj komori.

Ispitivanje pokriva:

- određivanje razlike između referentne mjerne lokacije i pokazivanja komore
- određivanje prostorne nehomogenosti unutar praznog korisnog volumena
- određivanje vremenske nestabilnosti unutar praznog korisnog volumena
- određivanje utjecaja zračenja
- na zahtjev korisnika, određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja u napunjenom i praznom korisnom prostoru za određenu mjernu lokaciju

#### **2.4.2.2. Metoda B**

Ispitivanje se odnosi na koristan volumen obuhvaćen mjernim lokacijama unutar napunjene komore. Punjenje komore se može izvršiti prema korisnikovom uobičajenom načinu punjenja komore ili punjenjem najmanje 40% korisnog volumena testnim tijelima. Za određivanje mjernih nesigurnosti vrijede ista pravila kao i za metodu A. Utjecaj samog punjenja određuje se dodatnim mjerenjem u središnjoj mjernoj lokaciji u praznom stanju. Umjeravanje je znanost točnog prenošenja neke fizikalne veličine od etalona do nepoznatog mjerila.

Ispitivanje obuhvaća:

- određivanje korekcije pokazivanja komore, odnosno razlike između vrijednosti izmjerene u referentnoj lokaciji i pokazivanja komore, u napunjenom stanju
- određivanje prostorne nehomogenosti u napunjenom korisnom volumenu
- određivanje vremenske nestabilnosti u napunjenom korisnom volumenu
- određivanje utjecaja zračenja
- određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja napunjenog i praznog prostora za referentnu mjernu lokaciju

#### 2.4.2.3. Metoda C

Ispitivanje se odnosi na pojedinačne mjerne lokacije unutar komore, koje ne definiraju koristan volumen.

Ispitivanje obuhvaća:

- određivanje korekcije pokazivanja komore, odnosno razlike između vrijednosti izmjerene u pojedinoj mjernoj lokaciji i pokazivanja komore
- određivanje vremenske nestabilnosti u mjernoj lokaciji
- određivanje utjecaja zračenja u mjernoj lokaciji
- na zahtjev korisnika, određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja u mjernoj lokaciji napunjenog i praznog korisnog volumena

### 3. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

#### 3.1. Mjerna nesigurnost

Niti jedno mjerenje nije potpuno precizno, što znači da ne možemo biti potpuno sigurni u rezultate naših mjerenja. Zbog toga se pri svakom mjerenju javlja sumnja u rezultat, koja predstavlja mjernu nesigurnost.

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen mjernom rezultatu, koji označava rasipanje vrijednosti, što se smije razborito pripisati mjernoj veličini.

Nesigurnost nije jednaka pogrešci mjerenja. Pogreška je razlika između izmjerene i stvarne vrijednosti, dok je nesigurnost kvantifikacija sumnje u rezultat mjerenja.

Kako bismo mjernu nesigurnost kvantificirali potrebno je znati interval nesigurnosti te nivo pouzdanosti. Interval predstavlja gornju i donju granicu odstupanja, a nivo pouzdanosti nam govori koliko smo sigurni da se stvarna vrijednosti nalazi u tom intervalu.

#### 3.2. Pogreške kod mjerenja

Pogreške čije vrijednosti ne znamo su izvor nesigurnosti. Pogreške koje se javljaju tijekom ispitivanja možemo podijeliti na one koje nastaju tokom samog mjerenja te one koje nastaju zbog kasnijeg oštećenja mjernog signala. Posebno je važno da se tijekom bilo kojeg mjerenja pogreške smanje što je više moguće te nakon toga odredi maksimalna pogreška mjerenja. Kako bi se pogreške koje nastaju tijekom mjerenja mogle smanjiti, potrebno je napraviti detaljnu analizu izvora pogrešaka u sustavu. Nakon analize, potrebno je pronaći način na koji bi se pogreške mogle smanjiti ili ukloniti.

Uzrok pogrešaka mogu biti:

- Mjerni instrument jer su podložni trošenju, pomacima, imaju slabu rezoluciju, dolazi do pojave šumova
- Mjerna metoda
- Objekt mjerenja koji nije stabilan
- Vještina mjeritelja
- Parametri okoline (temperatura, tlak, vlažnost itd.)

Pogreške nastale tijekom procesa mjerenja mogu se podijeliti na sustavne i slučajne pogreške.

### **3.2.1. Sustavne pogreške**

Sustavne pogreške opisuju pogreške u izlaznim očitanjima mjernog uređaja koje se konstantno nalaze na jednoj strani ispravnog očitavanja, odnosno sve pogreške su ili pozitivne ili negativne. Glavni izvori takvih pogrešaka su poremećaji u sustavu nastali tijekom mjerenja te utjecaj promjena u okolišu. Izvori također mogu biti iskrivljene igle mjernih uređaja te mjerni uređaj koji nije umjeren.

### **3.2.2. Slučajne pogreške**

Kod slučajnih pogrešaka razlike između mjerne vrijednosti i stvarne vrijednosti mogu biti i pozitivne i negativne te su uzrokovane slučajnim i nepredvidivim efektima. I negativne i pozitivne pogreške se najčešće javljaju u približno jednakom broju tijekom mjerenja. Do slučajnih pogrešaka često dolazi kada čovjek očitava rezultat mjerenja na skali, pogotovo ako se očitavanja nalaze između dvaju točaka na skali.

## **3.3. Izračun mjerne nesigurnosti**

Za izračun mjerne nesigurnosti, prvo je potrebno odrediti izvore nesigurnosti te procijeniti veličinu nesigurnosti. Neovisno o izvoru, nesigurnosti se mogu procjenjivati dvama metodama: metoda procjene tipa A i metoda procjene tipa B. Tokom mjerenja, najčešće su potrebne procjene oba tipa. Kako bi se izračunala ukupna mjerna nesigurnost potrebno je, za svaku od navedenih metoda, podatke svesti na jednaku razinu pouzdanosti, odnosno na standardnu nesigurnost.

### **3.3.1. Izračun pojedinačne mjerne nesigurnosti**

#### **3.3.1.1. Procjene tipa A**

Procjene tipa A su one procjene koje koriste statističke podatke, obično dobivene iz više puta ponovljenih mjerenja. Za podatke koje dobijemo ovom metodom, standardna nesigurnost računa se iz standardne devijacije za sve podatke dobivene mjerenjem. Ovakav način obrade podataka primjeren je Gauss-ovoj, odnosno normalnoj razdiobi, kod koje su podaci grupirani

oko srednje vrijednosti, a učestalost pojavljivanja pada kako se odmičemo od srednje vrijednosti.

Srednja vrijednost :

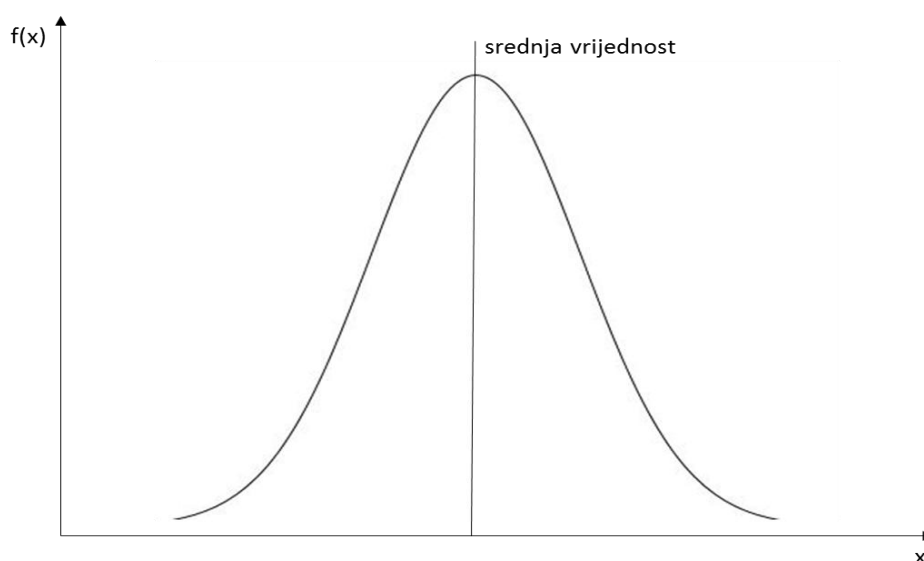
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

Standardna devijacija:

$$s(X) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti:

$$s(\bar{X}) = u_A = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$



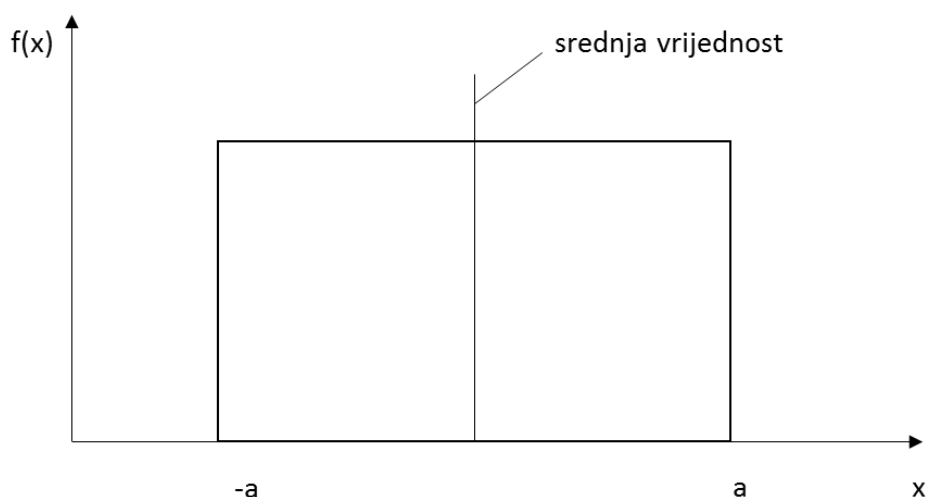
**Slika 1.    Gaussova raspodjela**

### 3.3.1.2. Procjene tipa B

Procjene tipa B su one koje se baziraju na ostalim informacija, koje nisu dobivene statističkom analizom niza opažanja. One mogu biti prethodno iskustvo, iz vanjskih umjernica, proračuna, proizvođačkih specifikacija ili drugih objavljenih izvora kako što su knjige. Kod ove metode nam je poznat interval nesigurnosti u kojem se vjerojatno nalazi prava vrijednost te takvu razdiobu nazivamo pravokutnom.

Standardna nesigurnost:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$



Slika 2. Pravokutna raspodjela

### 3.3.2. Izračun kombinirane mjerne nesigurnosti

Kada smo pojedinačne mjerne nesigurnosti sveli na standardnu nesigurnost, možemo odrediti ukupnu nesigurnost.

Ukupna nesigurnost:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (5)$$



Ukupnu nesigurnost možemo izraziti  $U$  i kao proširenu nesigurnost koja predstavlja produkt kombinirane nesigurnosti  $u$  i faktora pokrivanja  $k$ . Proširenu nesigurnost koristimo kako bi definirali širi interval unutar kojeg očekujemo da se nalazi prava vrijednosti rezultata, i to možemo tvrditi s velikom vjerojatnošću. Faktor pokrivanja najčešće iznosi  $k=2$ .

Proširena nesigurnost:

$$U = k \cdot u \quad (6)$$

### 3.4. Doprinosi mjernoj nesigurnosti

Veliki doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti pri ispitivanju termometrijske komore imaju prostorni gradijenti (prostorna nehomogenost), vremenske nestabilnosti temperature, sama napunjenost komore te utjecaj zračenja.

#### 3.4.1. Prostorni temperaturni gradijent

Prostorni gradijenti utječu na prostornu nehomogenost temperature. Prostorna nehomogenost definirana je kao najveće odstupanje temperature u jednoj od mjernih lokacija od referentne mjerne lokacije.

Srednja vrijednost izmjerene temperature  $i$ -tog termometra (mjerne lokacije) dana je jednadžbom:

$$t_{sr}(i) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_j(i) \quad (7)$$

Gdje  $K$  predstavlja broj mjerenja.

Apsolutna vrijednost prostornog gradijenta između referentne točke te jedne od mjernih lokacija je:

$$|\Delta t_{ref}| = |t_{ref} - t_{sr}(i)| \quad (8)$$

Prostorna nehomogenost temperature:

$$\delta t_{nehom} = \max |\Delta t_{ref}| \quad (9)$$

Mjerna nesigurnost zbog prostorne nehomogenosti:

$$u(\delta t_{nehom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \delta t_{nehom} \quad (10)$$

### 3.4.2. Vremenska nestabilnost

Standardna nesigurnost vremenske nestabilnosti izračunata je iz standardne devijacije  $s$ , prema jednažbama od (2) i (3).

### 3.4.3. Utjecaj zračenja

Za temperature zraka u komori različite od okolišne temperature, temperatura unutarnjih zidova komore uvijek odstupa od temperature zraka u komori. Pod takvim uvjetima, tijela u komori ne postižu temperaturu zraka zbog izmjene topline zračenjem. To vrijedi i za ispitna tijela u komori (ako ih ima) i za termometre koji se koriste tokom ispitivanja. Razlika između temperature zraka koja se utvrđuje te temperature termometra ovisi o emisijskom faktoru površine termometra, dimenzijama i poziciji senzora, brzini zraka oko senzora te razlici između temperature zraka u komori te zidova komore.

Utjecaj zračenja može se procijeniti na jedan od četiri različita načina:

1. Određivanje utjecaja zračenja odvija se mjerenjem temperature u sredini korisnog volumena korištenjem termometra sa što većim mogućim emisijskim faktorom ( $\epsilon > 0,6$ ) i termometra sa što manjim mogućim emisijskim faktorom ( $\epsilon < 0,15$ ). Moguće je koristiti termometar s poliranom površinom od nikla (niska emisivnost) te termometar s teflonskom površinom (visoka emisivnost). Emisijski faktori obaju termometara moraju biti poznati, uz dovoljnu točnost. Termometar s niskim emisijskim faktorom daje približnu vrijednost temperature zraka u komori. Razlika utvrđena između pokazivanja dvaju termometara predstavlja mjeru utjecaja zračenja ako temperatura zraka u komori te temperatura zida nisu jednake.
2. Temperatura zraka se također može mjeriti termometrom koji je zaštićen od utjecaja zračenja zidova, upotrebom zaštite od zračenja. Zaštita mora biti ventilirana ili svojim dizajnom i načinom postavljanja mora dopustiti da termometar bude izložen cirkulirajućem zraku. Dok je zaštita postavljena na termometar on mjeri temperaturu zraka, a nakon njenog uklanjanja radijacijsku temperaturu. Razlika između tih temperatura predstavlja mjeru utjecaja zračenja.

3. Maksimalni utjecaj zračenja može se odrediti mjerenjem temperature zidova te temperature zraka korištenjem termometra s niskim emisijskim faktorom ili termometra sa zaštitom od zračenja.
4. Za temperature od 0 °C do 50 °C utjecaj zračenja se ne mora utvrđivati mjerenjem te se može pretpostaviti da je maksimalni doprinos mjernoj nesigurnosti 0,3 K. Ako je razlika između okolišne temperature te temperature zraka u komori veća od 30 K, utjecaj zračenja potrebno je odrediti prema jednoj od tri prethodno navede metode.

Doprinos utjecaja zračenja dan je jednadžbom:

$$\delta t_{zr} = |t_{zr} - t_{ref}| \quad (11)$$

Mjerna nesigurnost zbog zračenja:

$$u(\delta t_{zr}) = \frac{\delta t_{zr}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

### 3.5. Ukupna standardna nesigurnost

Ukupna standardna mjerna nesigurnost za k=1:

$$u(k = 1) = \sqrt{u_{tref}^2 + u_{\delta tref}^2 + u_{\delta tdrift}^2 + u_{tkom}^2 + u_{\delta trez}^2 + u_{\delta tstab}^2 + u_{\delta tnehom}^2 + u_{\delta tzt}^2} \quad (13)$$

$t_{ref}$ - srednja temperatura referentnog termometra; doprinos mjernoj nesigurnosti jednak je standardnoj devijaciji srednje vrijednosti temperature referentnog termometra

$\delta t_{drift}$ - utjecaj klizanja termometara; doprinos prema iskustvu iznosi 15 mK

$\delta t_{rez}$ - rezolucija namještanja temperature na komori; doprinos nesigurnosti iznosi 100 mK

$\delta t_{ref}$ - odstupanje referentnog termometra; doprinos iznosi 95 mK, što je maksimalna vrijednost nesigurnosti umjeravanja termometara, prihvaćena za sve termometre na svim temperaturama radi jednostavnosti

$t_{kom}$ - vrijesnot temperature postavljena na regulatoru komore

$\delta t_{stab}$ -stabilnost temperature u komori; doprinos mjernoj nesigurnosti jednak je maksimalnoj vrijednosti standardne devijacije srednje vrijednosti

Ukupna mjerna nesigurnost za  $k=2$ :

$$U(k = 2) = 2 \cdot u(k = 1) \quad (14)$$

## 4. ISPITNI POSTUPCI

### 4.1. Raspored mjernih lokacija

#### 4.1.1. Metoda A i B

Ispitivanje se provodi u više mjernih lokacija unutar korisnog volumena. Za komore volumena do 2000 l, zahtjevi za brojem i prostornom pozicijom mjernih točaka određuju se prema normi DIN EN 60068, prema kojoj mjerne lokacije čine vrhove i prostorno središte kvadra koji omeđuje korisni volumen komore. Za komore većih volumena, mjerne lokacije su raspoređene u korisnom volumenu tako da tvore kubičnu rešetku kod koje je raspon između mjernih lokacija konstantan i veličine do 1m. Na zahtjev korisnika mogu se odabrati i drugi položaji mjernih lokacija koji moraju biti opisani u certifikatu o ispitivanju te moraju odgovarati minimalnim zahtjevima o prostornom rasporedu mjernih lokacija.

Rezultati ispitivanja važeći su samo za volumen obuhvaćen mjernim točkama. Interpolacija vrijednosti dobivenih mjerenjem dozvoljena je samo za korisni volumen, dok interpolacija mjerne nesigurnosti nije dozvoljena. Također nije dozvoljena niti ekstrapolacija mjernih rezultata izvan volumena omeđenog mjernim lokacijama. Dimenzije ukupnog volumena komore te odabrane mjerne lokacije moraju biti prikazane skicom u potvrdi o ispitivanju.

#### 4.1.2. Metoda C

Za metodu C, ispitivanja u pojedinim mjernim lokacija unutar korisnog volumena dozvoljena su samo na zahtjev korisnika. U tom slučaju, rezultati ispitivanja su važeći samo za ispitane mjerne lokacije, što mora biti naznačeno u potvrdi o ispitivanju. Doprinos mjernoj nesigurnosti uslijed lokalne prostorne nehomogenosti na mjernim lokacijama mora biti utvrđen za svaku mjernu lokaciju, korištenjem dva termometra s približnim razmakom od 2 do 5 cm između njih.

### 4.2. Određivanje prostornih gradijenata

Na prostornu nehomogenost utječu horizontalni i vertikalni gradijenti temperature. Temperaturni gradijent predstavlja povećanje temperature u smjeru normale na izotermnu plohu. To je vektor okomit na izotermnu plohu, s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature.

Temperaturni gradijent:

$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (15)$$

Skalarna vrijednost temperaturnog gradijenta  $\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$  predstavlja njegovu najveću vrijednost.

Projekcije vektora  $\text{grad } \vartheta$  na koordinatne osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ :

$$(\text{grad } \vartheta)_x = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, x) = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (16)$$

$$(\text{grad } \vartheta)_y = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, y) = \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \quad (17)$$

$$(\text{grad } \vartheta)_z = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, z) = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \quad (18)$$

### 4.3. Određivanje vremenske nestabilnosti

Vremenska nestabilnost određuje se iz temperaturnih promjena zabilježenih tijekom perioda od najmanje 30 minuta nakon što su postignuti stabilni uvjeti. Stabilni uvjeti se smatraju postignutima kada sustavne promjene temperature postaju nemjerljive. Za mjerenje vremenske nestabilnosti potrebno je zabilježiti najmanje 30 mjernih rezultata tijekom 30 minuta, s više ili manje konstantnim vremenskim razmakom. Mjerenja treba provesti barem za centar korisnog volumena ili za referentnu mjernu lokaciju, pri svakoj ispitnoj temperaturi. Vremensku nestabilnost potrebno je odrediti pri svim metodama ispitivanja (A, B i C).

### 4.4. Određivanje dinamike zagrijavanja

Dinamika zagrijavanja predstavlja brzinu zagrijavanja od početne temperature do neke zadane temperature. Pokazuje nam koliko je vremena potrebno da se postigne novo stabilno stanje nakon promjene prvobitnih uvjeta.

## 5. UMJERAVANJE TERMOMETARA

Umjeravanje termometara potrebno je provesti kako bi ispitivanje karakteristika komore bilo što pouzdanije. Umjeravanje se vršilo u kupkama na istim ispitnim temperaturama kao i ispitivanje komore, odnosno na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za umjeravanje termometara pri temperaturama  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  koristila se jedna vrsta kupke (TEKUP01), a za preostale temperature druga vrsta kupke (TEKUP11).

### 5.1. Opis postupka umjeravanja termometara

Prilikom umjeravanja termometara korišten je sličan ispitni postupak za sve temperature. Pri temperaturama do  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  termometri su bili smješteni unutar izotermnog bloka kako bi se smanjio utjecaj postojećih temperaturnih gradijenata te utjecaj temperature nestabilnosti. Za umjeravanje na temperaturama  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  nije korišten izotermni blok. Nakon postavljanja termometara unutar kupke, podešavamo željenu temperaturu na regulatoru te čekamo da se ona postigne. Nakon što radni medij postigne željenu temperaturu, potrebno je pričekati da se ona ustabilji. Kada se postigne dovoljna razina stabilnosti, na računalu pokrećemo program koji očitava otpore izmjerene na termometrima preko temperaturnog otporničkog mosta te spremamo očitane podatke. Na temelju tih otpora možemo izračunati temperature te odrediti odstupanja umjeranih termometara u odnosu na etalon.

### 5.2. Mjerna oprema i uređaji korišteni pri umjeravanju termometara

#### 5.2.1. Etalonski termometar

Kao referentni termometar prilikom umjeravanja termometara za ispitivanje komore korišten je štapni platinski otpornički termometar proizvođača Hart Scientific, SAD. Osnovne karakteristike etalonskog termometara dane su u sljedećoj tablici.



Tablica 1. Karakteristike etalonskog termometra

|                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Proizvođač                          | Hart Scientific                     |
| Model                               | 5628                                |
| Nominalni otpor                     | 25.5 $\Omega$                       |
| Broj komada                         | 2                                   |
| Temperaturno područje               | -200 °C do 660 °C                   |
| Način spajanja                      | četrožilno                          |
| Dimenzije osjetnika                 | Duljina: 30 mm                      |
| Dimenzije zaštitne cijevi           | Promjer: 6.35 mm<br>Duljina: 508 mm |
| Godišnja stabilnost, $u(C_{TT2,i})$ | <b>3 mK (<math>i=1, i=2</math>)</b> |



Slika 3. Etalonski termometar

### 5.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most

Tablica 2. Karakteristike etalonskog termometrijskog most

|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Proizvođač                          | Anton Paar        |
| Model                               | MKT 100           |
| Mjerna struja                       | 1 mA              |
| Radno područje                      | 0 do 440 $\Omega$ |
| Deklarirana točnost                 | < 400 $\mu\Omega$ |
| Rezolucija, $2a(C_{XTT2})$          | 100 $\mu\Omega$   |
| Vrijeme potrebno za uravnoteživanje | 0.72 s            |
| Spajanje termometara                | Četverožilno      |



Slika 4. Etalonski termometrijski otpornički most

### 5.2.3. Termometrijske kupke

Tablica 3. Karakteristike termometrijskih kupki

|                         |                 |                  |
|-------------------------|-----------------|------------------|
| Temperaturno područje   | -20 °C do 25 °C | 50 °C do 70 °C   |
| Proizvođač              | Dema            | Heto Calibration |
| Model                   | 2000            | KB22-1           |
| Radni medij             | Etanol          | Voda             |
| Temperaturni gradijenti | < $\pm 40$ mK   | < $\pm 40$ mK    |



Slika 6. Kupka (TEKUP01)



Slika 5. Kupka (TEKUP11)

#### 5.2.4. Umjeravani termometri

**Tablica 4. Karakteristike otporničkih termometara**

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| Proizvođač                         | Marus |
| Tip                                | PT100 |
| Klasa točnosti prema ISO/IEC 60751 | A     |

#### 5.2.5. Računalo

Računalo nam služi za trenutni prikaz mjerenja te za spremanje podataka. Prilikom umjeravanja termometara na računalu vidimo temperature koje očitavaju pojedini termometri.

### 5.3. Rezultati umjeravanja termometara

**Tablica 5. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, a**

| termometar                             | t <sub>et</sub> | 1            | 2            | 3            |
|--|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| otpor, Ohm                             | 23.3756085      | 92.356       | 92.354       | 92.663       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000454742     | 0.003        | 0.003        | 0.003        |
| temperatura, °C                        | -19.894         | -19.504      | -19.509      | -18.721      |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>0.390</b> | <b>0.385</b> | <b>1.173</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10              | 2.545        | 2.545        | 2.545        |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.005           | 0.008        | 0.008        | 0.008        |

**Tablica 6. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, b**

| termometar                             | t <sub>et</sub> | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           |
|--|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| otpor, Ohm                             | 23.379          | 92.461       | 92.599       | 92.586       | 92.554       | 92.410       | 92.609       | 92.264       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000           | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.002        |
| temperatura, °C                        | -19.859         | -19.236      | -18.884      | -18.916      | -18.999      | -19.366      | -18.858      | -19.736      |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>0.623</b> | <b>0.976</b> | <b>0.943</b> | <b>0.861</b> | <b>0.493</b> | <b>1.001</b> | <b>0.124</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000          | 2.545        | 2.545        | 2.545        | 2.545        | 2.545        | 2.545        | 2.545        |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.005           | 0.008        | 0.008        | 0.008        | 0.008        | 0.007        | 0.008        | 0.006        |

Tablica 7. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, a

| termometar                             | t_et   | 1            | 2            | 3            |
|--|--------|--------------|--------------|--------------|
| otpor, Ohm                             | 25.386 | 100.034      | 100.014      | 100.202      |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000  | 0.003        | 0.002        | 0.002        |
| temperatura, °C                        | -0.112 | 0.086        | 0.035        | 0.517        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |        | <b>0.198</b> | <b>0.147</b> | <b>0.630</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000 | 2.559        | 2.559        | 2.559        |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.003  | 0.007        | 0.005        | 0.006        |

Tablica 8. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, b

| termometar                             | t_et   | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10            |
|--|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 25.385 | 100.045      | 100.127      | 100.155      | 100.096      | 100.048      | 100.165      | 99.862        |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000  | 0.002        | 0.002        | 0.003        | 0.002        | 0.001        | 0.002        | 0.001         |
| temperatura, °C                        | -0.115 | 0.114        | 0.324        | 0.396        | 0.247        | 0.122        | 0.422        | -0.354        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |        | <b>0.229</b> | <b>0.439</b> | <b>0.511</b> | <b>0.362</b> | <b>0.238</b> | <b>0.537</b> | <b>-0.239</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000 | 2.559        | 2.559        | 2.559        | 2.559        | 2.559        | 2.559        | 2.559         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.001  | 0.006        | 0.006        | 0.007        | 0.006        | 0.004        | 0.005        | 0.002         |

Tablica 9. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, a

| termometar                             | t_et   | 1             | 2             | 3            |
|--|--------|---------------|---------------|--------------|
| otpor, Ohm                             | 27.907 | 109.676       | 109.630       | 109.705      |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000  | 0.003         | 0.002         | 0.002        |
| temperatura, °C                        | 24.872 | 24.849        | 24.733        | 24.925       |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |        | <b>-0.022</b> | <b>-0.139</b> | <b>0.053</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000 | 2.577         | 2.577         | 2.577        |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.003  | 0.007         | 0.005         | 0.005        |

Tablica 10. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, b

| termometar                             | t_et   | 4             | 5             | 6            | 7             | 8             | 9            | 10            |
|--|--------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 27.907 | 109.653       | 109.632       | 109.757      | 109.619       | 109.655       | 109.684      | 109.473       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000  | 0.002         | 0.005         | 0.002        | 0.009         | 0.002         | 0.001        | 0.001         |
| temperatura, °C                        | 24.870 | 24.792        | 24.736        | 25.060       | 24.704        | 24.795        | 24.872       | 24.327        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |        | <b>-0.078</b> | <b>-0.133</b> | <b>0.191</b> | <b>-0.165</b> | <b>-0.074</b> | <b>0.003</b> | <b>-0.543</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000 | 2.577         | 2.577         | 2.577        | 2.577         | 2.577         | 2.577        | 2.577         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.002  | 0.005         | 0.013         | 0.006        | 0.023         | 0.005         | 0.002        | 0.002         |

**Tablica 11. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, a**

| termometar                             | t <sub>et</sub> | 1             | 2             | 3             |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 30.416          | 119.282       | 119.201       | 119.292       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000           | 0.001         | 0.001         | 0.000         |
| temperatura, °C                        | 49.925          | 49.705        | 49.495        | 49.730        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>-0.220</b> | <b>-0.430</b> | <b>-0.195</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000          | 2.597         | 2.597         | 2.597         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.001           | 0.003         | 0.003         | 0.001         |

**Tablica 12. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, b**

| termometar                             | t <sub>et</sub> | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             | 9             | 10            |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 30.417          | 119.298       | 119.153       | 119.366       | 119.149       | 119.215       | 119.226       | 119.100       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000           | 0.000         | 0.001         | 0.001         | 0.001         | 0.001         | 0.001         | 0.000         |
| temperatura, °C                        | 49.933          | 49.747        | 49.370        | 49.924        | 49.360        | 49.531        | 49.561        | 49.231        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>-0.185</b> | <b>-0.563</b> | <b>-0.009</b> | <b>-0.573</b> | <b>-0.402</b> | <b>-0.372</b> | <b>-0.702</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000          | 2.597         | 2.597         | 2.597         | 2.597         | 2.597         | 2.597         | 2.597         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.000           | 0.001         | 0.002         | 0.003         | 0.003         | 0.003         | 0.003         | 0.001         |



Tablica 13. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, a

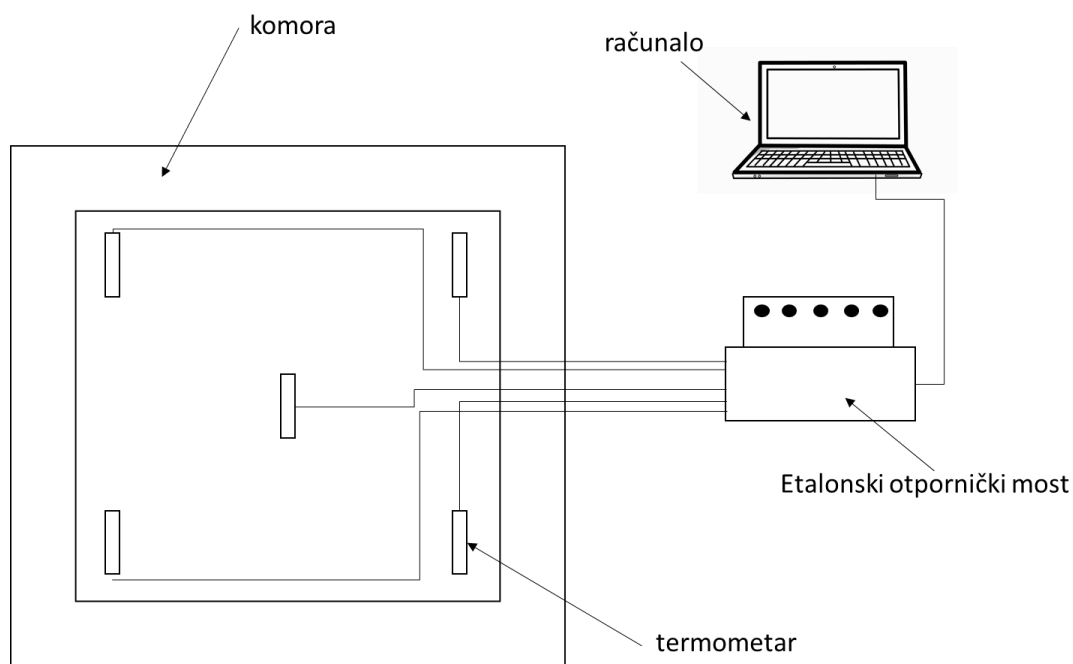
| termometar                             | t <sub>et</sub> | 1             | 2             | 3             |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 32.412          | 126.888       | 126.615       | 126.888       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000           | 0.004         | 0.008         | 0.003         |
| temperatura, °C                        | 69.997          | 69.518        | 68.803        | 69.515        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>-0.480</b> | <b>-1.194</b> | <b>-0.482</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000          | 2.613         | 2.613         | 2.613         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.003           | 0.010         | 0.020         | 0.007         |

Tablica 14. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, b

| termometar                             | t <sub>et</sub> | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             | 9             | 10            |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| otpor, Ohm                             | 32.415          | 126.925       | 126.515       | 126.983       | 126.515       | 126.735       | 126.736       | 126.739       |
| standardna nesigurnost očitavanja, Ohm | 0.000           | 0.003         | 0.009         | 0.002         | 0.007         | 0.003         | 0.004         | 0.002         |
| temperatura, °C                        | 70.024          | 69.613        | 68.541        | 69.764        | 68.543        | 69.116        | 69.119        | 69.127        |
| <b>odstupanje u odnosu na etalon</b>   |                 | <b>-0.411</b> | <b>-1.483</b> | <b>-0.260</b> | <b>-1.481</b> | <b>-0.908</b> | <b>-0.905</b> | <b>-0.898</b> |
| koef. Osjetljivosti, °C/Ohm            | 10.000          | 2.613         | 2.613         | 2.613         | 2.613         | 2.613         | 2.613         | 2.613         |
| standardna nesigurnost očitavanja, °C  | 0.002           | 0.008         | 0.022         | 0.006         | 0.019         | 0.007         | 0.009         | 0.005         |

## 6. ISPITIVANJE KOMORE U LPM

### 6.1. Shema ispitnog sustava



Slika 7. Shema ispitnog sustava

### 6.2. Mjerni uređaji i oprema korišteni pri ispitivanju komore

#### 6.2.1. Ispitivana komora

Tablica 15. Karakteristike komore

|                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Temperaturno područje     | -20 °C do 90 °C                     |
| Proizvođač                | KÖTTERMANN                          |
| Model                     | 2306                                |
| Dimenzije radnog volumena | 550 mm x 550 mm<br>x 800 mm (240 L) |



**Slika 8. Termometrijska komora**

#### **6.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most**

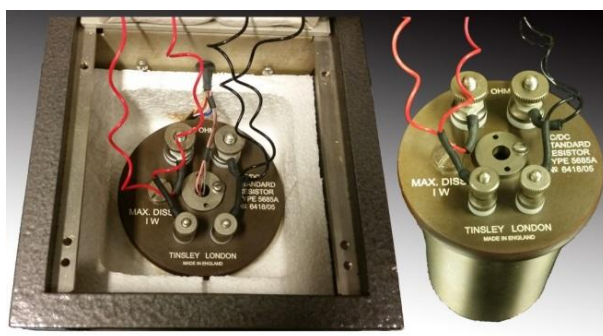
Za mjerenje otpora platinskih otpornih termometara korišten je izmjenični otporni most F700 proizvođača „ASL Limited“, Velika Britanija. Može mjeriti otpore u području od  $0.25 \Omega$  do  $400 \Omega$ . . Da bismo mogli koristiti isti most za mjerenje otpora više termometara, na njega je priključen multipleksor SB148/01. Multipleksor ima deset kanala za povezivanje termometara na most te se pomoću njega termometri mogu konstantno održavati na radnoj temperaturi, čime se smanjuje vrijeme potrebno da most očita otpore.



Slika 9. Etalonski termometrijski otpornički most

### 6.2.3. Etalonski otpornik u grijanom kućištu

U kombinaciji s odabranim mostom, omogućava nam mjerenje otpora termometara u području od  $0\ \Omega$  do  $399.9999\ \Omega$ , s rezolucijom  $0.1\ m\Omega$ . Pripadne rezolucije mjerenja temperature su približno  $0.3\ mK$  za termometar nominalnog otpora  $100\ \Omega$  i približno  $1\ mK$  za termometar nominalnog otpora  $25.5\ \Omega$ .



Slika 10. Etalonski otpornik u grijanom kućištu

### 6.2.4. Računalo

Računalo nam služi za bilježenje izmjerenih vrijednosti temperature u komori. Vrijednosti se bilježe približno svake tri minute.

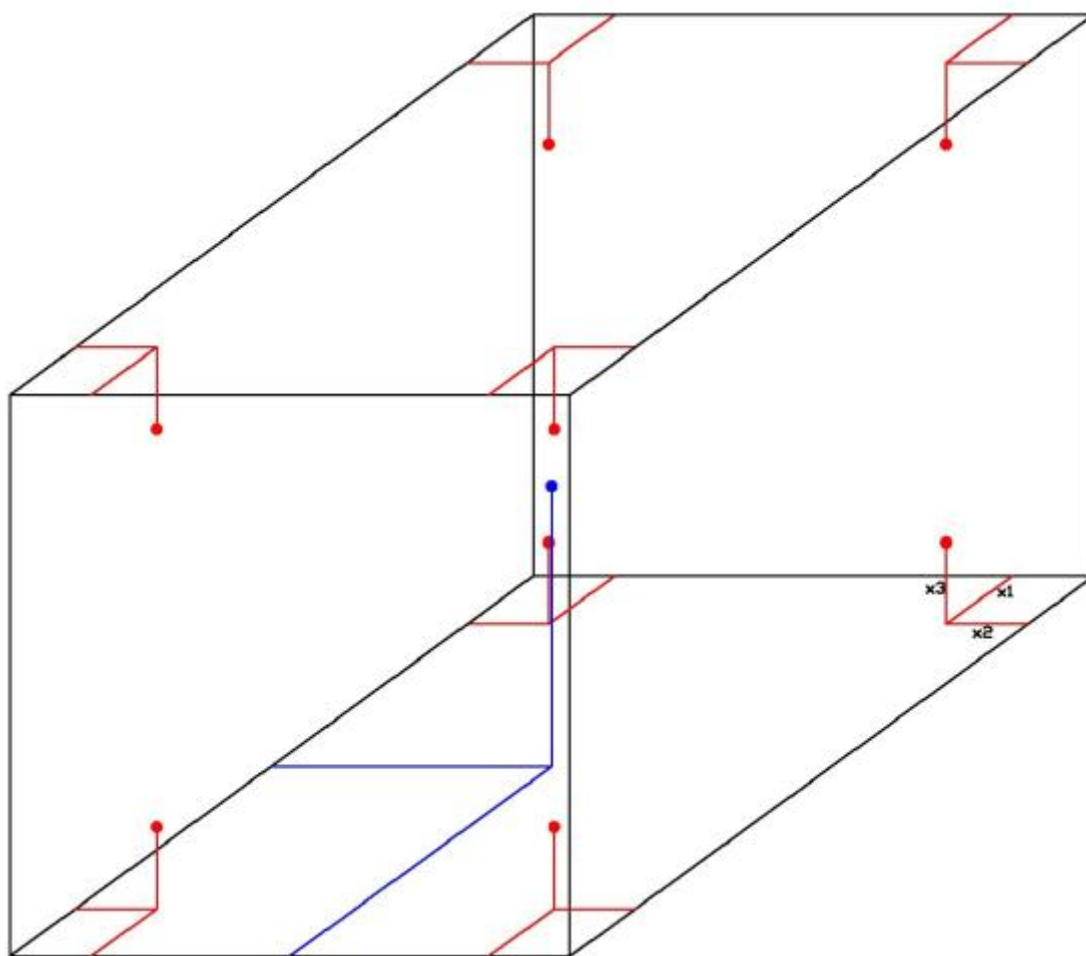
### 6.3. Opis postupka ispitivanja

Tijekom ispitivanja komore primjenjivala se jednaka oprema za određivanje prostorne nehomogenosti, temperaturne nestabilnosti kao i dinamike zagrijavanja. Za potrebe ispitivanja korišteno je deset otporničkih termometara smještenih na različitim mjestima unutar korisnog volumena komore. Osam termometara smješteno je na najudaljenija mjesta od sredine komore, odnosno u kutove korisnog volumena komore, dok je u sredinu smješten referentni termometar te termometar sa zaštitom od zračenja. Termometri su unutar komore smješteni pomoću metalne konstrukcije te su svi, osim referentnog termometra, od zidova komore približno udaljeni za 100 mm. Komora tijekom ispitivanja nije bila napunjena.

Nakon postavljanja termometara, može početi mjerenje. Na komori se podesi željena temperatura, te treba proći određeno vrijeme da se ona postigne. Nakon postizanja tražene temperature, potrebno je pričekati da postane stabilna. Stabilnost temperature vidimo tako što je njena vrijednost približno konstantna. Vrijeme trajanja mjerenja nakon postizanja stabilnog stanja je 3 sata.

Smještaj termometara:

- Termometar broj 1 smješten je u lijevi prednji donji kut komore
- Termometar broj 2 smješten je u lijevi stražnji donji kut komore
- Termometar broj 3 smješten je u lijevi prednji gornji kut komore
- Termometar broj 4 smješten je u lijevi stražnji gornji kut komore
- Termometar broj 5 smješten je u desni prednji gornji kut komore
- Termometar broj 6 smješten je u desni stražnji gornji kut komore
- Termometar broj 7 smješten je u desni prednji donji kut komore
- Termometar broj 8 smješten je u desni stražnji donji kut komore



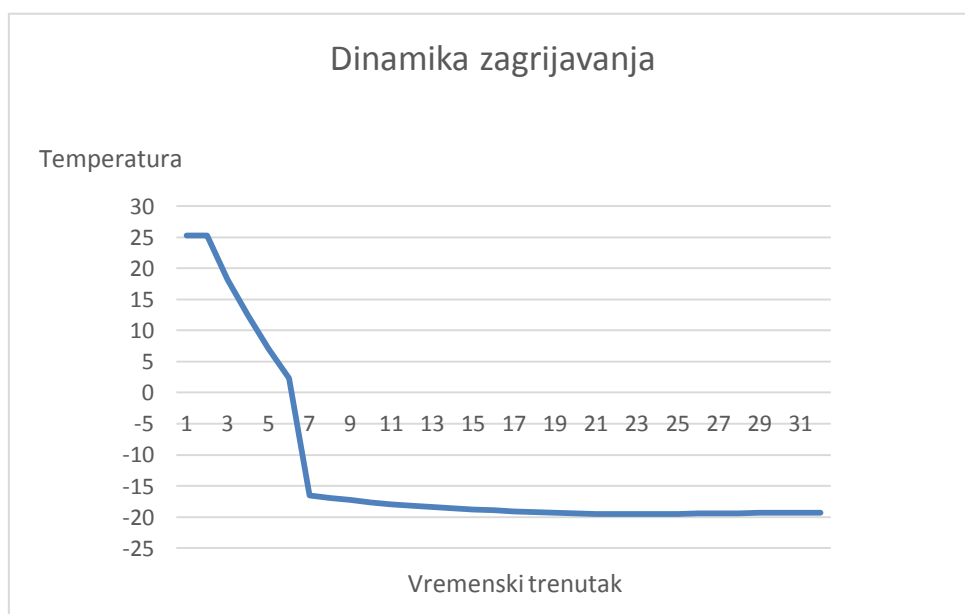
Slika 11. Smještaj termometara u komori

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA KOMORE

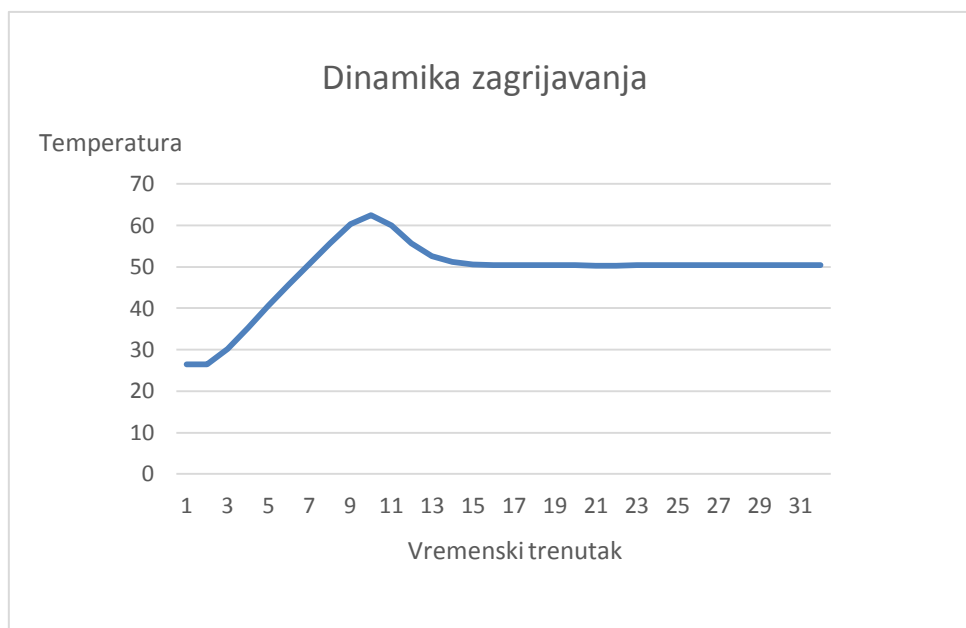
### 7.1. Rezultati ispitivanja dinamike zagrijavanja



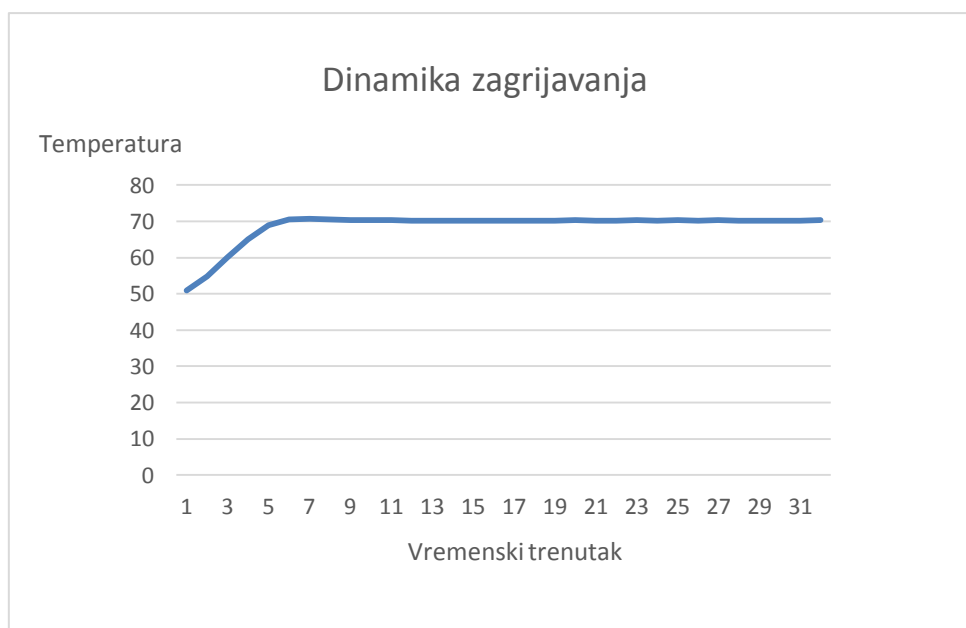
**Dijagram 1. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od -20 °C do 0 °C**



**Dijagram 2. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do -20 °C**



**Dijagram 3. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do 50 °C**



**Dijagram 4. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 50 °C do 70 °C**



## 7.2. Izračun doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti

Tablica 16. Rezultati ispitivanja komore pri -20 °C

| termometar                       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9 (ref)       | 10 (zrač) |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|-----------|
| $t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$      | -19.74 | -19.89 | -20.75 | -20.61 | -20.79 | -20.22 | -20.77 | -19.90 | <b>-20.27</b> | -20.00    |
| $u_{stab}(k=1), \text{mK}$       | 17     | 18     | 19     | 21     | 21     | 19     | 22     | 19     | <b>18</b>     | 18        |
| $ \Delta t_{ref} , \text{mK}$    | 532    | 380    | 472    | 341    | 515    | 49     | 495    | 371    | <b>0</b>      | 275       |
| $\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$ | 0.27   |        |        |        |        |        |        |        |               |           |
| $\delta t_{nehom}, \text{mK}$    | 532    |        |        |        |        |        |        |        |               |           |
| $u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$ | 307    |        |        |        |        |        |        |        |               |           |
| $\delta t_{zr}, \text{mK}$       | 275    |        |        |        |        |        |        |        |               |           |

Tablica 17. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri -20 °C

| Oznaka  | Opis   | Temperature i korekcije | Doprinos nesigurnosti, mK | Razdioba               | Stand. nesigurnost, mK |
|---|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| $t_{ref}$   | Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki | -20.27                  | 18                        | Normalna ( $1\sigma$ ) | 18                     |
| $\delta t_{ref}$                                  | Odstupanje referentnog termometra                                    | 0                       | 95                        | Normalna ( $2\sigma$ ) | 47.5                   |
| $\delta t_{drift}$                                | Klizanje termometara   | 0                       | 15                        | Pravokutna             | 12                     |
| $t_{kom}$   | Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore              | -20                     | 0                         | Normalna               | 0                      |
| $\delta t_{rez}$                                  | Rezolucija namještanja temperature na komori                         | 0                       | 100                       | Pravokutna             | 29                     |
| $\delta t_{stab}$                                 | Stabilnosti temperature u komori (80 min)                            | 0                       | 22                        | Normalna ( $1\sigma$ ) | 22                     |
| $\delta t_{nehomog}$                              | Prostorna nehomogenost temperature                                   | 0                       | 532                       | Pravokutna             | 307                    |
| $\delta t_{zr}$                                   | Utjecaj zračenja   | 0                       | 275                       | Pravokutna             | 159                    |
| Ukupna standardna nesigurnost ( $k=1, 68\%$ ), mK |  |                         |                           |                        | <b>351</b>             |
| Ukupna nesigurnost ( $k=2, 95\%$ ), mK            |  |                         |                           |                        | <b>702</b>             |

Tablica 18. Rezultati ispitivanja komore pri 0 °C

| termometar                       | 1     | 2    | 3     | 4    | 5     | 6    | 7     | 8    | 9 (ref)     | 10 (zrač) |
|----------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------------|-----------|
| $t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$      | 0.46  | 0.37 | -0.04 | 0.06 | -0.15 | 0.28 | -0.19 | 0.29 | <b>0.14</b> | 0.36      |
| $u_{stab}(k=1), \text{mK}$       | 3     | 3    | 6     | 4    | 5     | 4    | 6     | 4    | <b>3</b>    | 3         |
| $ \Delta t_{ref} , \text{mK}$    | 315   | 232  | 185   | 81   | 292   | 140  | 334   | 147  | 0           | 220       |
| $\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$ | -0.14 |      |       |      |       |      |       |      |             |           |
| $\delta t_{nehom}, \text{mK}$    | 334   |      |       |      |       |      |       |      |             |           |
| $u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$ | 193   |      |       |      |       |      |       |      |             |           |
| $\delta t_{zr}, \text{mK}$       | 220   |      |       |      |       |      |       |      |             |           |

Tablica 19. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 0 °C

| Oznaka  | Opis   | Temperature i korekcije | Doprinos nesigurnosti, mK | Razdioba               | Stand. nesigurnost, mK |
|---|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| $t_{ref}$   | Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki | 0.14                    | 3                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 3                      |
| $\delta t_{ref}$                                  | Odstupanje referentnog termometra                                    | 0                       | 95                        | Normalna ( $2\sigma$ ) | 47.5                   |
| $\delta t_{drift}$                                | Klizanje termometara   | 0                       | 15                        | Pravokutna             | 12                     |
| $t_{kom}$   | Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore              | 0                       | 0                         | Normalna               | 0                      |
| $\delta t_{rez}$                                  | Rezolucija namještanja temperature na komori                         | 0                       | 100                       | Pravokutna             | 29                     |
| $\delta t_{stab}$                                 | Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)                | 0                       | 6                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 6                      |
| $\delta t_{nehomog}$                              | Prostorna nehomogenost temperature                                   | 0                       | 334                       | Pravokutna             | 193                    |
| $\delta t_{zr}$                                   | Utjecaj zračenja   | 0                       | 220                       | Pravokutna             | 127                    |
| Ukupna standardna nesigurnost ( $k=1, 68\%$ ), mK |  |                         |                           |                        | <b>238</b>             |
| Ukupna nesigurnost ( $k=2, 95\%$ ), mK            |  |                         |                           |                        | <b>475</b>             |

Tablica 20. Rezultati ispitivanja komore pri 25 °C

| termometar                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9 (ref)      | 10 (zrač) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------|
| $t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$      | 25.57 | 25.53 | 25.61 | 25.58 | 25.60 | 25.56 | 25.56 | 25.49 | <b>25.57</b> | 25.58     |
| $u_{stab}(k=1), \text{mK}$       | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 1     | 2     | 1     | <b>2</b>     | 2         |
| $ \Delta t_{ref} , \text{mK}$    | 7     | 35    | 40    | 14    | 38    | 5     | 9     | 75    | <b>0</b>     | 11        |
| $\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$ | -0.57 |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{nehom}, \text{mK}$    | 75    |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$ | 43    |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{zr}, \text{mK}$       | 11    |       |       |       |       |       |       |       |              |           |

Tablica 21. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 25 °C

| Oznaka  | Opis   | Temperature i korekcije | Doprinos nesigurnosti, mK | Razdioba               | Stand. nesigurnost, mK |
|---|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| $t_{ref}$   | Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki | 25.57                   | 2                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 2                      |
| $\delta t_{ref}$                                  | Odstupanje referentnog termometra                                    | 0                       | 95                        | Normalna( $2\sigma$ )  | 47.5                   |
| $\delta t_{drift}$                                | Klizanje termometara   | 0                       | 15                        | Pravokutna             | 12                     |
| $t_{kom}$   | Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore              | 25                      | 0                         | Normalna               | 0                      |
| $\delta t_{rez}$                                  | Rezolucija namještanja temperature na komori                         | 0                       | 100                       | Pravokutna             | 29                     |
| $\delta t_{stab}$                                 | Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)                | 0                       | 2                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 2                      |
| $\delta t_{nehomog}$                              | Prostorna nehomogenost temperature                                   | 0                       | 75                        | Pravokutna             | 43                     |
| $\delta t_{zr}$                                   | Utjecaj zračenja   | 0                       | 11                        | Pravokutna             | 6                      |
| Ukupna standardna nesigurnost ( $k=1$ , 68 %), mK |  |                         |                           |                        | <b>72</b>              |
| Ukupna nesigurnost ( $k=2$ , 95 %), mK            |  |                         |                           |                        | <b>144</b>             |

Tablica 22. Rezultati ispitivanja komore pri 50 °C

| termometar                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9 (ref)      | 10 (zrač) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------|
| $t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$      | 50.62 | 50.82 | 51.00 | 50.65 | 51.03 | 50.66 | 50.94 | 50.66 | <b>50.75</b> | 50.54     |
| $u_{stab}(k=1), \text{mK}$       | 4     | 4     | 9     | 5     | 5     | 5     | 5     | 4     | <b>5</b>     | 4         |
| $ \Delta t_{ref} , \text{mK}$    | 132   | 76    | 252   | 96    | 281   | 83    | 189   | 85    | 0            | 210       |
| $\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$ | -0.75 |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{nehom}, \text{mK}$    | 281   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$ | 163   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{zr}, \text{mK}$       | 210   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |

Tablica 23. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 50 °C

| Oznaka  | Opis   | Temperature i korekcije | Doprinos nesigurnosti, mK | Razdioba               | Stand. nesigurnost, mK |
|---|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| $t_{ref}$   | Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki | 50.75                   | 5                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 5                      |
| $\delta t_{ref}$                                  | Odstupanje referentnog termometra                                    | 0                       | 95                        | Normalna ( $2\sigma$ ) | 47.5                   |
| $\delta t_{drift}$                                | Klizanje termometara   | 0                       | 15                        | Pravokutna             | 12                     |
| $t_{kom}$   | Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore              | 50                      | 0                         | Normalna               | 0                      |
| $\delta t_{rez}$                                  | Rezolucija namještanja temperature na komori                         | 0                       | 100                       | Pravokutna             | 29                     |
| $\delta t_{stab}$                                 | Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)                | 0                       | 9                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 9                      |
| $\delta t_{nehomog}$                              | Prostorna nehomogenost temperature                                   | 0                       | 281                       | Pravokutna             | 163                    |
| $\delta t_{zr}$                                   | Utjecaj zračenja   | 0                       | 210                       | Pravokutna             | 121                    |
| Ukupna standardna nesigurnost ( $k=1$ , 68 %), mK |  |                         |                           |                        | <b>211</b>             |
| Ukupna nesigurnost ( $k=2$ , 95 %), mK            |  |                         |                           |                        | <b>422</b>             |

Tablica 24. Rezultati ispitivanja komore pri 70 °C

| termometar                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9 (ref)      | 10 (zrač) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-----------|
| $t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$      | 70.83 | 71.58 | 71.51 | 71.01 | 72.04 | 70.92 | 71.86 | 71.02 | <b>71.16</b> | 70.57     |
| $u_{stab}(k=1), \text{mK}$       | 6     | 5     | 10    | 7     | 11    | 4     | 4     | 3     | <b>4</b>     | 4         |
| $ \Delta t_{ref} , \text{mK}$    | 328   | 421   | 345   | 153   | 877   | 241   | 700   | 143   | 0            | 586       |
| $\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$ | -1.16 |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{nehom}, \text{mK}$    | 877   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$ | 506   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |
| $\delta t_{zr}, \text{mK}$       | 586   |       |       |       |       |       |       |       |              |           |

Tablica 25. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 70 °C

| Oznaka  | Opis   | Temperature i korekcije | Doprinos nesigurnosti, mK | Razdioba               | Stand. nesigurnost, mK |
|---|--|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| $t_{ref}$                                     | Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki | 71.16                   | 4                         | Normalna ( $1\sigma$ ) | 4                      |
| $\delta t_{ref}$                              | Odstupanje referentnog termometra                                    | 0                       | 95                        | Normalna( $2\sigma$ )  | 47.5                   |
| $\delta t_{drift}$                            | Klizanje termometara   | 0                       | 15                        | Pravokutna             | 12                     |
| $t_{kom}$                                     | Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore              | 70                      | 0                         | Normalna               | 0                      |
| $\delta t_{rez}$                              | Rezolucija namještanja temperature na komori                         | 0                       | 100                       | Pravokutna             | 29                     |
| $\delta t_{stab}$                             | Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)                | 0                       | 11                        | Normalna ( $1\sigma$ ) | 11                     |
| $\delta t_{nehomog}$                          | Prostorna nehomogenost temperature                                   | 0                       | 877                       | Pravokutna             | 506                    |
| $\delta t_{zr}$                               | Utjecaj zračenja   | 0                       | 586                       | Pravokutna             | 338                    |
| Ukupna standardna nesigurnost (k=1, 68 %), mK |  |                         |                           |                        | <b>612</b>             |
| Ukupna nesigurnost (k=2, 95 %), mK            |  |                         |                           |                        | <b>1224</b>            |

## 8. ZAKLJUČAK

U ovome radu ispitana je termometrijska komora te su umjereni otpornički termometri. Mjerenja su provedena kako bi se odredila ukupna mjerna nesigurnost komore te kako bismo vidjeli što ima najveći utjecaj na mjernu nesigurnost komore.

Kod umjeravanja termometara vidimo da odstupanja temperature ispitivanih termometara od etalonskog nisu značajno različita uslijed same promjene temperature nego na njih utječu neki vanjski čimbenici.

Najveći utjecaj na mjernu nesigurnost umjeravanja komore ima prostorna nehomogenost, a nakon toga zračenje. Možemo vidjeti da se povećanjem temperature najčešće povećava i prostorna nehomogenost. Utjecaj zračenja javlja se kada se temperatura u komori razlikuje od vanjske okolišne temperature. Možemo vidjeti da se taj utjecaj na temperaturama do 50 °C ne razlikuje znatno, dok je na temperaturi od 70 °C veći i više od dva puta.

Što je razlika između temperature u komori te vanjske okolišne temperature veća veći su i utjecaji koji pridonose ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja.

## **LITERATURA**

- [1] Calibration of Climatic Chamber, DKD, 2004.
- [2] Galović, A.: Termodinamika I, FSB, Zagreb, 2013.
- [3] Zaimović-Uzunović, N.: Mjerna tehnika, Zenica, 2006.
- [4] Morris, A. S.: Measurements and Instrumentation Principles, 2001.
- [5] Zvizdić, D.: Mjerenja u energetici, podloge za predavanja
- [6] Galović, A.: Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2014.
- [7] Jones, D. P.: Biomedical sensors, Momentum Press, 2010.

## PRILOZI

Tablica 26. Izmjerene vrijednosti temperature pri -20° C

| Termometar/broj mjerenja | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9 (ref) | 10 (zrač) |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| j=1                      | -19.555 | -19.742 | -19.835 | -20.262 | -20.075 | -19.516 | -20.199 | -19.671 | -19.516 | -20.122   |
| j=2                      | -19.532 | -19.719 | -19.781 | -20.216 | -20.030 | -19.502 | -20.120 | -19.608 | -19.453 | -20.058   |
| j=3                      | -19.500 | -19.655 | -19.748 | -20.186 | -19.999 | -19.441 | -20.124 | -19.596 | -19.441 | -20.032   |
| j=4                      | -19.473 | -19.628 | -19.691 | -20.156 | -19.970 | -19.411 | -20.025 | -19.524 | -19.385 | -19.991   |
| j=5                      | -19.432 | -19.587 | -19.650 | -20.100 | -19.914 | -19.356 | -20.031 | -19.504 | -19.348 | -19.938   |
| j=6                      | -19.411 | -19.566 | -19.629 | -20.033 | -19.878 | -19.350 | -19.956 | -19.451 | -19.327 | -19.933   |
| j=7                      | -19.405 | -19.561 | -19.592 | -19.965 | -19.810 | -19.298 | -19.981 | -19.454 | -19.299 | -19.904   |
| j=8                      | -19.377 | -19.517 | -19.579 | -20.006 | -19.820 | -19.292 | -19.898 | -19.402 | -19.278 | -19.884   |
| j=9                      | -19.326 | -19.481 | -19.543 | -19.978 | -19.792 | -19.264 | -19.870 | -19.373 | -19.248 | -19.854   |
| j=10                     | -19.327 | -19.482 | -19.545 | -19.995 | -19.747 | -19.219 | -19.903 | -19.391 | -19.235 | -19.841   |
| j=11                     | -19.314 | -19.469 | -19.531 | -19.935 | -19.780 | -19.252 | -19.858 | -19.360 | -19.236 | -19.842   |
| j=12                     | -19.314 | -19.469 | -19.532 | -19.936 | -19.781 | -19.253 | -19.859 | -19.355 | -19.230 | -19.821   |
| j=13                     | -19.293 | -19.448 | -19.511 | -19.930 | -19.775 | -19.248 | -19.854 | -19.350 | -19.226 | -19.816   |
| j=14                     | -19.289 | -19.444 | -19.507 | -19.941 | -19.755 | -19.227 | -19.832 | -19.335 | -19.211 | -19.817   |
| j=15                     | -19.289 | -19.445 | -19.507 | -19.942 | -19.756 | -19.228 | -19.834 | -19.334 | -19.210 | -19.815   |
| j=16                     | -19.288 | -19.443 | -19.506 | -19.910 | -19.755 | -19.227 | -19.841 | -19.336 | -19.212 | -19.818   |
| j=17                     | -19.290 | -19.446 | -19.508 | -19.943 | -19.742 | -19.214 | -19.827 | -19.347 | -19.222 | -19.828   |
| j=18                     | -19.301 | -19.456 | -19.519 | -19.900 | -19.745 | -19.218 | -19.835 | -19.370 | -19.215 | -19.821   |
| j=19                     | -19.293 | -19.448 | -19.542 | -19.911 | -19.756 | -19.228 | -19.842 | -19.353 | -19.229 | -19.835   |
| j=20                     | -19.307 | -19.463 | -19.525 | -19.900 | -19.744 | -19.217 | -19.838 | -19.373 | -19.218 | -19.824   |
| j=21                     | -19.296 | -19.451 | -19.513 | -19.907 | -19.752 | -19.224 | -19.838 | -19.373 | -19.233 | -19.823   |
| j=22                     | -19.296 | -19.451 | -19.513 | -19.949 | -19.697 | -19.185 | -19.861 | -19.349 | -19.209 | -19.815   |
| j=23                     | -19.287 | -19.443 | -19.505 | -19.940 | -19.754 | -19.226 | -19.816 | -19.351 | -19.212 | -19.817   |
| j=24                     | -19.299 | -19.445 | -19.477 | -19.912 | -19.725 | -19.213 | -19.819 | -19.338 | -19.199 | -19.805   |
| j=25                     | -19.295 | -19.433 | -19.526 | -19.942 | -19.755 | -19.228 | -19.833 | -19.335 | -19.212 | -19.817   |



Tablica 27. Izmjerene vrijednosti temperature pri 0 °C

| Termometar/broj mjerenja | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9 (ref) | 10 (zrač) |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-----------|
| j=1                      | 0.668 | 0.527 | 0.589 | 0.308 | 0.308 | 0.823 | 0.200 | 0.544 | 0.700   | 0.137     |
| j=2                      | 0.668 | 0.527 | 0.589 | 0.308 | 0.308 | 0.813 | 0.181 | 0.540 | 0.680   | 0.118     |
| j=3                      | 0.649 | 0.523 | 0.586 | 0.273 | 0.257 | 0.772 | 0.163 | 0.522 | 0.678   | 0.131     |
| j=4                      | 0.662 | 0.521 | 0.584 | 0.302 | 0.302 | 0.809 | 0.192 | 0.535 | 0.691   | 0.129     |
| j=5                      | 0.660 | 0.519 | 0.581 | 0.300 | 0.299 | 0.787 | 0.100 | 0.537 | 0.662   | 0.130     |
| j=6                      | 0.661 | 0.505 | 0.599 | 0.286 | 0.282 | 0.782 | 0.165 | 0.524 | 0.680   | 0.118     |
| j=7                      | 0.649 | 0.523 | 0.586 | 0.304 | 0.304 | 0.807 | 0.155 | 0.514 | 0.670   | 0.123     |
| j=8                      | 0.654 | 0.513 | 0.575 | 0.294 | 0.294 | 0.783 | 0.095 | 0.532 | 0.657   | 0.126     |
| j=9                      | 0.657 | 0.532 | 0.625 | 0.281 | 0.281 | 0.796 | 0.173 | 0.532 | 0.688   | 0.126     |
| j=10                     | 0.657 | 0.531 | 0.594 | 0.281 | 0.250 | 0.757 | 0.140 | 0.499 | 0.655   | 0.108     |
| j=11                     | 0.639 | 0.514 | 0.639 | 0.326 | 0.326 | 0.817 | 0.193 | 0.537 | 0.693   | 0.130     |
| j=12                     | 0.661 | 0.520 | 0.551 | 0.270 | 0.270 | 0.785 | 0.121 | 0.496 | 0.652   | 0.112     |
| j=13                     | 0.642 | 0.486 | 0.517 | 0.236 | 0.251 | 0.766 | 0.173 | 0.516 | 0.672   | 0.110     |
| j=14                     | 0.641 | 0.515 | 0.609 | 0.296 | 0.281 | 0.780 | 0.170 | 0.514 | 0.670   | 0.107     |
| j=15                     | 0.638 | 0.513 | 0.576 | 0.294 | 0.262 | 0.770 | 0.160 | 0.519 | 0.675   | 0.113     |
| j=16                     | 0.644 | 0.519 | 0.581 | 0.300 | 0.300 | 0.768 | 0.158 | 0.517 | 0.673   | 0.127     |
| j=17                     | 0.657 | 0.517 | 0.579 | 0.297 | 0.313 | 0.821 | 0.211 | 0.554 | 0.711   | 0.148     |
| j=18                     | 0.679 | 0.554 | 0.647 | 0.335 | 0.335 | 0.842 | 0.225 | 0.584 | 0.724   | 0.162     |
| j=19                     | 0.693 | 0.552 | 0.614 | 0.302 | 0.301 | 0.803 | 0.180 | 0.523 | 0.679   | 0.117     |
| j=20                     | 0.648 | 0.522 | 0.538 | 0.256 | 0.288 | 0.792 | 0.198 | 0.510 | 0.666   | 0.119     |
| j=21                     | 0.650 | 0.509 | 0.572 | 0.259 | 0.259 | 0.767 | 0.173 | 0.532 | 0.688   | 0.133     |
| j=22                     | 0.664 | 0.523 | 0.585 | 0.273 | 0.273 | 0.780 | 0.171 | 0.514 | 0.670   | 0.108     |
| j=23                     | 0.638 | 0.513 | 0.576 | 0.294 | 0.294 | 0.789 | 0.168 | 0.511 | 0.668   | 0.105     |
| j=24                     | 0.636 | 0.511 | 0.573 | 0.292 | 0.307 | 0.810 | 0.192 | 0.508 | 0.664   | 0.101     |
| j=25                     | 0.632 | 0.507 | 0.570 | 0.257 | 0.257 | 0.772 | 0.178 | 0.522 | 0.678   | 0.115     |

Tablica 28. Izmjerene vrijednosti temperature pri 25 °C

| Termometar/broj mjerenja | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9 (ref) | 10 (zrač) |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| j=1                      | 25.539 | 25.381 | 25.649 | 25.491 | 25.459 | 25.742 | 25.380 | 25.412 | 25.553  | 25.018    |
| j=2                      | 25.537 | 25.379 | 25.647 | 25.489 | 25.457 | 25.741 | 25.378 | 25.410 | 25.567  | 25.032    |
| j=3                      | 25.543 | 25.385 | 25.653 | 25.495 | 25.463 | 25.747 | 25.384 | 25.415 | 25.557  | 25.022    |
| j=4                      | 25.541 | 25.383 | 25.651 | 25.493 | 25.461 | 25.744 | 25.382 | 25.414 | 25.571  | 25.035    |
| j=5                      | 25.547 | 25.389 | 25.657 | 25.499 | 25.467 | 25.750 | 25.388 | 25.419 | 25.561  | 25.026    |
| j=6                      | 25.545 | 25.387 | 25.654 | 25.497 | 25.465 | 25.748 | 25.386 | 25.418 | 25.575  | 25.039    |
| j=7                      | 25.551 | 25.393 | 25.660 | 25.503 | 25.471 | 25.754 | 25.392 | 25.408 | 25.565  | 25.030    |
| j=8                      | 25.549 | 25.391 | 25.658 | 25.501 | 25.469 | 25.752 | 25.390 | 25.421 | 25.563  | 25.028    |
| j=9                      | 25.547 | 25.389 | 25.657 | 25.499 | 25.467 | 25.750 | 25.388 | 25.419 | 25.561  | 25.026    |
| j=10                     | 25.545 | 25.387 | 25.654 | 25.497 | 25.465 | 25.748 | 25.386 | 25.418 | 25.575  | 25.039    |
| j=11                     | 25.551 | 25.393 | 25.660 | 25.503 | 25.471 | 25.754 | 25.392 | 25.408 | 25.565  | 25.030    |
| j=12                     | 25.549 | 25.391 | 25.658 | 25.501 | 25.469 | 25.752 | 25.390 | 25.421 | 25.563  | 25.028    |
| j=13                     | 25.547 | 25.389 | 25.657 | 25.499 | 25.467 | 25.750 | 25.388 | 25.419 | 25.577  | 25.041    |
| j=14                     | 25.560 | 25.403 | 25.668 | 25.511 | 25.479 | 25.746 | 25.400 | 25.407 | 25.565  | 25.030    |
| j=15                     | 25.549 | 25.391 | 25.658 | 25.501 | 25.469 | 25.752 | 25.390 | 25.421 | 25.579  | 25.043    |
| j=16                     | 25.554 | 25.397 | 25.664 | 25.507 | 25.475 | 25.758 | 25.396 | 25.412 | 25.569  | 25.033    |
| j=17                     | 25.553 | 25.395 | 25.662 | 25.505 | 25.473 | 25.756 | 25.394 | 25.425 | 25.583  | 25.047    |
| j=18                     | 25.559 | 25.401 | 25.668 | 25.511 | 25.479 | 25.762 | 25.400 | 25.415 | 25.573  | 25.038    |
| j=19                     | 25.556 | 25.399 | 25.666 | 25.509 | 25.477 | 25.760 | 25.398 | 25.429 | 25.571  | 25.035    |
| j=20                     | 25.555 | 25.397 | 25.664 | 25.507 | 25.475 | 25.758 | 25.396 | 25.427 | 25.585  | 25.049    |
| j=21                     | 25.568 | 25.411 | 25.670 | 25.513 | 25.481 | 25.764 | 25.402 | 25.418 | 25.575  | 25.039    |
| j=22                     | 25.559 | 25.401 | 25.668 | 25.511 | 25.479 | 25.762 | 25.400 | 25.431 | 25.573  | 25.038    |
| j=23                     | 25.556 | 25.399 | 25.666 | 25.509 | 25.477 | 25.760 | 25.414 | 25.414 | 25.571  | 25.051    |
| j=24                     | 25.570 | 25.413 | 25.677 | 25.519 | 25.488 | 25.755 | 25.409 | 25.424 | 25.582  | 25.046    |
| j=25                     | 25.565 | 25.408 | 25.675 | 25.517 | 25.486 | 25.769 | 25.406 | 25.422 | 25.579  | 25.044    |

Tablica 29. Izmjerene vrijednosti temperature pri 50 °C

| Termometar/broj mjerenja | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9 (ref) | 10 (zrač) |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| j=1                      | 50.385 | 50.385 | 50.828 | 50.479 | 50.479 | 50.669 | 50.352 | 50.256 | 50.383  | 49.844    |
| j=2                      | 50.382 | 50.382 | 50.858 | 50.484 | 50.484 | 50.674 | 50.357 | 50.230 | 50.373  | 49.833    |
| j=3                      | 50.372 | 50.372 | 50.847 | 50.474 | 50.474 | 50.665 | 50.379 | 50.252 | 50.379  | 49.839    |
| j=4                      | 50.378 | 50.378 | 50.821 | 50.472 | 50.472 | 50.662 | 50.377 | 50.250 | 50.377  | 49.837    |
| j=5                      | 50.408 | 50.408 | 50.883 | 50.502 | 50.502 | 50.692 | 50.406 | 50.279 | 50.406  | 49.867    |
| j=6                      | 50.406 | 50.406 | 50.849 | 50.484 | 50.484 | 50.674 | 50.388 | 50.261 | 50.388  | 49.849    |
| j=7                      | 50.388 | 50.387 | 50.760 | 50.442 | 50.442 | 50.633 | 50.315 | 50.252 | 50.315  | 49.792    |
| j=8                      | 50.362 | 50.362 | 50.743 | 50.425 | 50.425 | 50.615 | 50.330 | 50.234 | 50.361  | 49.822    |
| j=9                      | 50.361 | 50.361 | 50.852 | 50.487 | 50.487 | 50.677 | 50.391 | 50.264 | 50.391  | 49.852    |
| j=10                     | 50.422 | 50.422 | 50.866 | 50.501 | 50.501 | 50.691 | 50.405 | 50.278 | 50.405  | 49.865    |
| j=11                     | 50.403 | 50.395 | 50.742 | 50.425 | 50.425 | 50.615 | 50.298 | 50.234 | 50.329  | 49.790    |
| j=12                     | 50.360 | 50.360 | 50.804 | 50.439 | 50.439 | 50.638 | 50.352 | 50.233 | 50.359  | 49.820    |
| j=13                     | 50.391 | 50.391 | 50.882 | 50.517 | 50.517 | 50.707 | 50.389 | 50.294 | 50.420  | 49.849    |
| j=14                     | 50.420 | 50.420 | 50.860 | 50.495 | 50.495 | 50.685 | 50.399 | 50.272 | 50.399  | 49.859    |
| j=15                     | 50.430 | 50.413 | 50.777 | 50.460 | 50.459 | 50.650 | 50.364 | 50.268 | 50.364  | 49.824    |
| j=16                     | 50.395 | 50.392 | 50.765 | 50.447 | 50.447 | 50.637 | 50.351 | 50.232 | 50.359  | 49.820    |
| j=17                     | 50.390 | 50.390 | 50.763 | 50.445 | 50.445 | 50.635 | 50.350 | 50.239 | 50.365  | 49.826    |
| j=18                     | 50.397 | 50.397 | 50.785 | 50.467 | 50.467 | 50.658 | 50.372 | 50.245 | 50.388  | 49.849    |
| j=19                     | 50.419 | 50.419 | 50.799 | 50.482 | 50.482 | 50.672 | 50.386 | 50.259 | 50.386  | 49.847    |
| j=20                     | 50.418 | 50.409 | 50.774 | 50.457 | 50.457 | 50.647 | 50.361 | 50.266 | 50.361  | 49.822    |
| j=21                     | 50.392 | 50.392 | 50.756 | 50.439 | 50.438 | 50.628 | 50.342 | 50.278 | 50.373  | 49.834    |
| j=22                     | 50.405 | 50.389 | 50.769 | 50.452 | 50.452 | 50.642 | 50.356 | 50.261 | 50.388  | 49.849    |
| j=23                     | 50.387 | 50.387 | 50.768 | 50.450 | 50.450 | 50.640 | 50.355 | 50.291 | 50.354  | 49.815    |
| j=24                     | 50.386 | 50.386 | 50.766 | 50.449 | 50.448 | 50.639 | 50.353 | 50.290 | 50.353  | 49.813    |
| j=25                     | 50.416 | 50.400 | 50.772 | 50.455 | 50.455 | 50.645 | 50.359 | 50.264 | 50.391  | 49.851    |

Tablica 30. Izmjerene vrijednosti temperature pri 70 °C

| Termometar/broj mjerenja | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9 (ref) | 10 (zrač) |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| j=1                      | 70.382 | 70.446 | 71.147 | 70.700 | 70.679 | 70.679 | 70.416 | 70.128 | 70.256  | 69.681    |
| j=2                      | 70.319 | 70.446 | 71.068 | 70.621 | 70.605 | 70.621 | 70.427 | 70.139 | 70.266  | 69.660    |
| j=3                      | 70.297 | 70.393 | 71.031 | 70.584 | 70.584 | 70.648 | 70.360 | 70.089 | 70.232  | 69.658    |
| j=4                      | 70.292 | 70.387 | 71.025 | 70.578 | 70.578 | 70.642 | 70.371 | 70.099 | 70.227  | 69.652    |
| j=5                      | 70.354 | 70.386 | 71.087 | 70.640 | 70.624 | 70.656 | 70.384 | 70.113 | 70.272  | 69.666    |
| j=6                      | 70.367 | 70.431 | 71.061 | 70.614 | 70.582 | 70.678 | 70.390 | 70.119 | 70.246  | 69.672    |
| j=7                      | 70.342 | 70.405 | 71.107 | 70.612 | 70.612 | 70.676 | 70.389 | 70.125 | 70.269  | 69.694    |
| j=8                      | 70.395 | 70.395 | 71.097 | 70.618 | 70.609 | 70.673 | 70.402 | 70.130 | 70.258  | 69.683    |
| j=9                      | 70.385 | 70.385 | 71.015 | 70.633 | 70.538 | 70.665 | 70.378 | 70.106 | 70.266  | 69.691    |
| j=10                     | 70.329 | 70.393 | 71.015 | 70.568 | 70.568 | 70.663 | 70.376 | 70.104 | 70.232  | 69.658    |
| j=11                     | 70.359 | 70.359 | 70.981 | 70.596 | 70.532 | 70.655 | 70.367 | 70.095 | 70.223  | 69.648    |
| j=12                     | 70.349 | 70.349 | 70.971 | 70.528 | 70.526 | 70.654 | 70.366 | 70.079 | 70.238  | 69.632    |
| j=13                     | 70.334 | 70.350 | 70.980 | 70.600 | 70.536 | 70.664 | 70.377 | 70.105 | 70.233  | 69.658    |
| j=14                     | 70.360 | 70.376 | 71.076 | 70.597 | 70.581 | 70.677 | 70.389 | 70.118 | 70.277  | 69.701    |
| j=15                     | 70.338 | 70.402 | 71.032 | 70.593 | 70.589 | 70.684 | 70.397 | 70.126 | 70.285  | 69.711    |
| j=16                     | 70.348 | 70.412 | 70.994 | 70.609 | 70.481 | 70.641 | 70.353 | 70.090 | 70.249  | 69.675    |
| j=17                     | 70.344 | 70.344 | 70.950 | 70.566 | 70.439 | 70.598 | 70.326 | 70.071 | 70.231  | 69.656    |
| j=18                     | 70.358 | 70.358 | 70.995 | 70.612 | 70.548 | 70.676 | 70.388 | 70.117 | 70.260  | 69.686    |
| j=19                     | 70.387 | 70.387 | 71.025 | 70.578 | 70.551 | 70.676 | 70.389 | 70.118 | 70.277  | 69.703    |
| j=20                     | 70.340 | 70.372 | 70.994 | 70.547 | 70.546 | 70.674 | 70.387 | 70.115 | 70.274  | 69.700    |
| j=21                     | 70.338 | 70.370 | 70.992 | 70.617 | 70.513 | 70.672 | 70.384 | 70.121 | 70.265  | 69.690    |
| j=22                     | 70.392 | 70.392 | 70.974 | 70.607 | 70.543 | 70.670 | 70.383 | 70.119 | 70.279  | 69.704    |
| j=23                     | 70.342 | 70.374 | 70.996 | 70.549 | 70.547 | 70.674 | 70.387 | 70.123 | 70.267  | 69.692    |
| j=24                     | 70.394 | 70.394 | 71.016 | 70.569 | 70.505 | 70.664 | 70.377 | 70.114 | 70.257  | 69.682    |
| j=25                     | 70.384 | 70.384 | 70.958 | 70.579 | 70.459 | 70.618 | 70.347 | 70.095 | 70.255  | 69.680    |